



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

摩擦磨损与耐磨材料

Frictional Wear and Wear Resistant Materials

● 王振廷 孟君晟 主编

哈尔滨工业大学出版社

013033713

TH117.1
09

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

摩擦磨损与耐磨材料

王振廷 孟君晟 主编



北航

C1641129

哈尔滨工业大学出版社

TH117.1
09

内容提要

本书共分9章,主要介绍了金属表面的特性、接触表面之间的相互作用、摩擦磨损过程中金属表层的组织结构变化;各种摩擦磨损机理及影响摩擦磨损的内外因素;摩擦磨损的测试方法和材料磨损失效分析;各种耐磨材料的成分、组织、性能和应用。

本书可作为高等院校材料科学与工程专业高年级本科生和硕士研究生教材及参考书,也可作为材料科学与工程领域的大专院校教师和科技工作者的参考书。

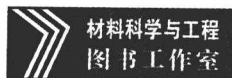
图书在版编目(CIP)数据

摩擦磨损与耐磨材料/王振廷,孟君晟主编.——哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.3

ISBN 978-7-5603-3850-7

I. ①摩… II. ①王…②孟… III. ①磨损-研究②耐磨材料-研究 IV. ①TH117.1 ②TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 283321 号



责任编辑 张秀华
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 14.75 字数 341 千字
版 次 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-3850-7
定 价 30.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

物体表面相互接触或相对运动时就会发生摩擦,因此摩擦是自然界存在的一种普遍现象。有摩擦就有磨损发生,据不完全统计,能源的 $1/3$ 到 $1/2$ 消耗于摩擦与磨损,约 80% 的机器零件失效是由摩擦与磨损引起的,所以磨损是机器最常见也是最大量的一种失效方式。如果能科学地运用摩擦磨损理论和采用先进的耐磨材料,就可以防止和减轻摩擦磨损带来的损失,进而提高工作效率,降低生产成本,节省资金,节约能源。

本书共分 9 章,主要介绍了金属表面的特性、接触表面之间的相互作用、摩擦磨损过程中金属表层的变化;各种摩擦磨损机理及影响摩擦磨损的内外因素;摩擦磨损的测试方法和材料磨损失效分析;各种耐磨材料的成分、组织、性能和应用。

本书可作为高等院校材料科学与工程专业高年级本科生和硕士研究生教材及参考书,也可作为材料科学与工程领域的大专院校教师和科技工作者的参考书。

本书由王振廷、孟君晟主编,第 1、7、8、9 章由王振廷编写,第 2、3、4、5、6 章由孟君晟编写。全书由王振廷统编。

由于学识所限,加之内容涉及面广,疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2012 年 9 月

目 录

第1章 金属表面特性	1
1.1 金属的表面结构	1
1.1.1 金属表面几何形状	1
1.1.2 金属的晶体结构	6
1.1.3 金属晶体的缺陷	8
1.2 表面能与表面张力	11
1.2.1 表面能	11
1.2.2 表面张力	13
1.3 金属表面的化学性质	14
1.3.1 物理吸附	14
1.3.2 化学吸附	14
1.3.3 氧化	15
1.4 金属表层的组成	15
1.5 接触表面间的相互作用	16
1.5.1 固体表面的接触过程	16
1.5.2 接触表面间的相互作用	17
1.6 接触面积	18
1.6.1 接触面积	18
1.6.2 实际接触面积与载荷的关系	19
第2章 摩擦	22
2.1 摩擦的定义及分类	22
2.1.1 摩擦的定义	22
2.1.2 摩擦的分类	22
2.2 古典摩擦定律	23
2.3 滑动摩擦	24
2.3.1 滑动摩擦理论	24
2.3.2 滑动摩擦的影响因素	29
2.4 滚动摩擦	32
2.4.1 基本概念	32
2.4.2 滚动摩擦机理	32

2.5	边界摩擦	35
2.5.1	边界摩擦机理	35
2.5.2	影响边界膜的因素	36
第3章	摩擦过程中金属表层的变化	39
3.1	摩擦表面几何形状的变化	39
3.2	金属表面受力与变形	39
3.2.1	表面和次表面应力	39
3.2.2	塑性变形	40
3.2.3	塑性变形的深度	41
3.2.4	塑性变形沿深度的分布	41
3.3	摩擦表面结构的变化	42
3.4	摩擦表面温度及组织的变化	43
3.4.1	摩擦表面温度的变化	43
3.4.2	摩擦表面组织的变化	44
3.5	摩擦时的扩散过程	46
3.6	摩擦表面的氧化	46
第4章	材料的磨损	48
4.1	磨损概述	48
4.1.1	磨损的定义	48
4.1.2	磨损的分类	49
4.1.3	磨损的评定方法	49
4.2	黏着磨损	51
4.2.1	黏着磨损的特点与分类	51
4.2.2	黏着磨损的实验研究	53
4.2.3	黏着磨损的机理	56
4.2.4	黏着磨损的模型	58
4.2.5	磨屑的形成过程	63
4.2.6	影响黏着磨损的因素	66
4.3	磨粒磨损	71
4.3.1	磨粒磨损的定义与分类	71
4.3.2	磨粒磨损的简化模型	75
4.3.3	磨粒磨损机理	77
4.3.4	磨粒及其磨损性能	80
4.3.5	外部摩擦条件对磨粒磨损的影响	90
4.3.6	材料内部因素对磨粒磨损的影响	94
4.4	冲蚀磨损	102

4.4.1	冲蚀磨损的定义与分类	102
4.4.2	冲蚀磨损理论	103
4.4.3	影响冲蚀磨损的主要因素	106
4.5	接触疲劳磨损	110
4.5.1	接触疲劳磨损理论	111
4.5.1	影响接触疲劳磨损的主要因素	113
4.6	腐蚀磨损	115
4.6.1	氧化磨损	116
4.6.2	特殊介质腐蚀磨损	118
4.6.3	电化学腐蚀磨损	119
4.6.4	腐蚀磨粒磨损	120
4.7	微动磨损	122
4.7.1	微动磨损的定义及特点	122
4.7.2	微动磨损机理	123
4.7.3	影响微动磨损的原因和保护措施	125
第5章	摩擦与磨损的测试技术	129
5.1	摩擦磨损试验机	129
5.1.1	摩擦磨损试验方法	129
5.1.2	摩擦磨损试验机的分类	131
5.1.3	常用摩擦磨损试验机	131
5.2	表面分析技术及常用分析仪器	134
5.2.1	表面分析技术	134
5.2.2	常用表面分析仪器	136
5.3	磨屑检测分析技术	138
5.3.1	光谱分析法	139
5.3.2	铁谱分析法	140
第6章	磨损失效分析	143
6.1	磨损失效分析的特点及内容	143
6.1.1	磨损失效分析的特点	143
6.1.2	磨损失效分析的方法	148
6.1.3	磨损失效分析的主要内容	149
6.2	磨损失效分析的步骤	149
第7章	合金耐磨铸钢	152
7.1	铸造耐磨高锰钢	152
7.1.1	标准成分高锰钢	152
7.1.2	提高高锰钢耐磨性的方法	162

7.1.3	改性高锰钢	163
7.2	低合金耐磨铸钢	167
7.2.1	低合金耐磨铸钢的优点	167
7.2.2	低合金耐磨铸钢成分设计	167
7.2.3	低合金耐磨铸钢的类型	169
7.2.4	低合金耐磨铸钢的熔炼生产	170
7.2.5	合金耐磨铸钢热处理加热过程的特点	170
7.2.6	低合金耐磨铸钢的应用	171
7.3	空淬贝氏体耐磨铸钢	171
7.3.1	空淬贝氏体钢分类	172
7.3.2	稀土空淬贝氏体钢的成分设计	173
7.3.3	贝氏体钢的化学成分确定	174
7.3.4	空淬贝氏体钢 C 曲线设计思路	175
7.3.5	熔炼及浇注	175
7.3.6	空淬贝氏体钢的组织与性能	175
7.3.7	空淬贝氏体钢的应用	176
第 8 章	合金耐磨铸铁	178
8.1	低合金耐磨铸铁	178
8.1.1	普通白口铸铁	178
8.1.2	锰白口铸铁	179
8.1.3	钨白口铸铁	181
8.1.4	硼白口铸铁	183
8.1.5	钒白口铸铁	185
8.1.6	低铬白口铸铁	187
8.2	高铬合金白口铸铁	189
8.2.1	高铬白口铸铁组织与成分的关系	190
8.2.2	高铬白口铸铁的化学成分设计	191
8.2.3	高铬白口铸铁的铸态组织	193
8.2.4	高铬白口铸铁熔炼	194
8.2.5	高铬白口铸铁的热处理	200
8.2.6	影响高铬白口铸铁耐磨的主要因素	204
第 9 章	复合耐磨材料	208
9.1	双金属复合铸造耐磨材料	208
9.1.1	双金属复合铸造	208
9.1.2	双金属复合镶铸	211
9.2	复合铸渗耐磨材料	214

9.2.1	铸渗的基本原理	214
9.2.2	合金涂层(敷层)的制备	215
9.2.3	铸渗机理	217
9.2.4	影响铸渗层形成的因素	218
9.2.5	铸渗工艺	219
9.2.6	铸渗层的组织、性能及生产应用	221
9.2.7	铸铁铸渗件工艺实例	222
参考文献		224

第 1 章 金属表面特性

固体的表面性质主要包括两方面的内容,即表面形貌与表面组成。前者着重研究表面的形状,后者着重研究表面的结构及表面的物理、化学性质。由于摩擦现象发生在两个相对运动物体的表面之间,显然,物体的表面性质将直接影响摩擦和磨损,因此,研究接触体摩擦表面的性质是研究摩擦磨损的基础。

1.1 金属的表面结构

1.1.1 金属表面几何形状

经过加工的金属零件表面,即使是宏观上很平整、光滑,但在显微镜下观察时,就可发现表面很粗糙,好似大地上布满了峡谷、高岗和山峰,呈现凹凸不平的波峰和波谷,凸起的波峰称微凸体,如图 1.1 所示。这是由于加工过程中刀痕(即切屑分离时的塑性变形)以及机床-刀具-工件系统的振动等原因,造成实际的工件表面与理想的绝对光滑、平整的表面之间存在一定的几何形状误差。通常所说的固体表面几何形状包括微观粗糙度、宏观粗糙度(波纹度)和宏观几何形状偏差。在摩擦学中主要用表面波纹度和表面粗糙度来描述。

1. 表面波纹度

表面波纹度是零件表面周期性重复出现的一种几何形状误差,它主要是由切削过程中运动的不均匀性引起的,如机床-工件-刀具工艺系统存在强迫振动等,如图 1.1(b)所示。波纹度有两个重要参数,即波高 h 和波距 s ; T 和 s 及 H 和 h 分别表示宏观和微观粗糙度的波纹度波高和波距。

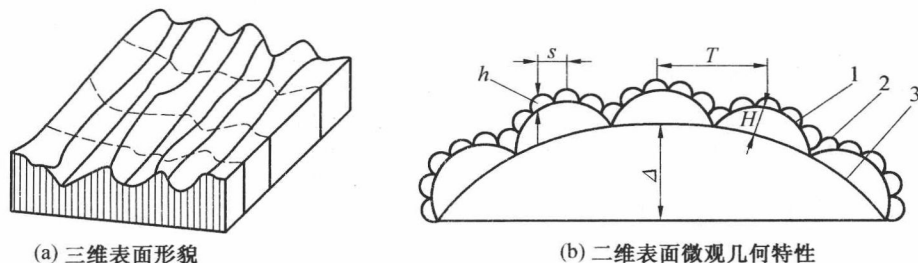


图 1.1 表面形貌

1—波纹度;2—粗糙度;3—宏观几何形状偏差; T —波纹度波距
 s —粗糙度波距; H —波纹度波距; h —粗糙度波高; Δ —形状误差

波高 h 表示波峰与波谷之间的距离。波距 s 表示相邻两波形对应点的距离。表面

波纹度的波距一般为 1 ~ 10 mm,波高与波长之比约为 1 : 40。

表面波纹度会减少零件实际支承表面面积,增大摩擦中表面牵引力的切向分量,在动配合中会引起零件磨损加剧。

2. 表面粗糙度

表面粗糙度高度和间距均很小,不像表面波纹度那样具有明显的周期性,其波距亦短,约 0.5 ~ 1 000 μm,波高亦较小,约 0.05 ~ 50 μm。它主要是由加工过程的刀痕、刀具和工件表面的摩擦、切屑分离时的塑性变形、金属撕裂以及工艺系统中存在着高频振动等原因造成的。表面粗糙度越低,则表面越光亮。

为了描述一个表面粗糙特征,国家标准(GB/T 3505—2000)规定表面粗糙度的评定指标主要有轮廓算术平均偏差 Ra 、微观不平度十点高度 Rz 、轮廓的最大高度 Ry 、轮廓的均方根偏差 Rq ,以及轮廓支承长度曲线等表面参数来评定。

(1) 轮廓算术平均偏差 Ra

轮廓的算术平均偏差 Ra 是在一个取样长度内纵坐标值 $f(x)$ 绝对值的算术平均值,如图 1.2 所示。其中,中线 m 是一特定的线,它将轮廓图形划分为上下两部分,并使上面实体面积和下面空间面积相等。

算术平均偏差的数学表达式为

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |f(x)| dx \tag{1.1}$$

式中, $f(x)$ 为轮廓图形的分布函数。

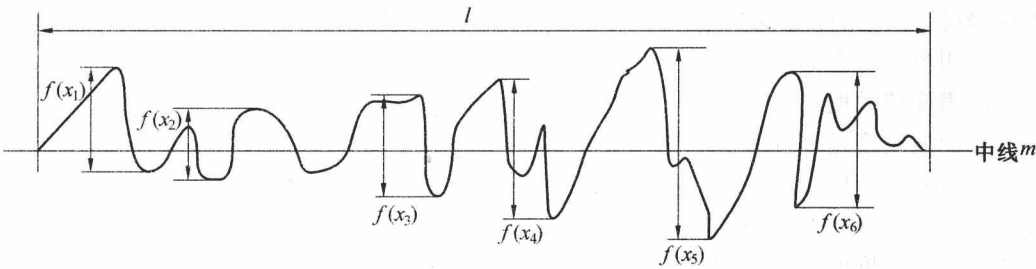


图 1.2 轮廓的算术平均偏差

标准长度 l 随粗糙度而定,粗糙度等级不同, l 的值也不同,见表 1.1。

表 1.1 Ra 、 Rz 、 Ry 的取样长度 l 与评定长度 l_n 的选用值

$Ra/\mu m$	Rz 与 $Ry/\mu m$	l/mm	$l_n(l_n = 5l)/mm$
0.008 ~ 0.02	0.025 ~ 0.10	0.08	0.4
0.02 ~ 0.1	0.10 ~ 0.50	0.25	1.25
0.1 ~ 2.0	0.50 ~ 10.0	0.8	4.0
2.0 ~ 10.0	10.0 ~ 50.0	2.5	12.5
10.0 ~ 80.0	50.0 ~ 320.0	8.0	40.0

(2) 均方根偏差 Rq

均方根偏差 Rq 为轮廓图形上各点和中线之间距离平方的平均值的平方根,其计算式如下

$$Rq = \left[\frac{1}{l} \int_0^l f^2(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

可以看出均方根偏差给予离开平均线较远的点较大的比重,因此,它更能高度地反映粗糙度的情况。

Ra 与 Rq 的关系为 $Ra \approx 0.8Rq$ 。

(3) 微观不平度十点高度 Rz

Rz 是指在标准长度 l 内五个最高的轮廓峰高的平均值与五个最低的轮廓谷深的平均值之和,如图 1.3 所示,其计算公式为

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 h_{pi} + \sum_{i=1}^5 h_{vi}}{5} \quad (1.3)$$

式中, h_{pi} 为第 i 个最高的轮廓峰高; h_{vi} 为第 i 个最低的轮廓谷深。

若测量长度包括几个标准长度时,应取该测量长度内所测得的几个 Ra 或 Rz 的平均值作为某一表面的 Ra 或 Rz 。

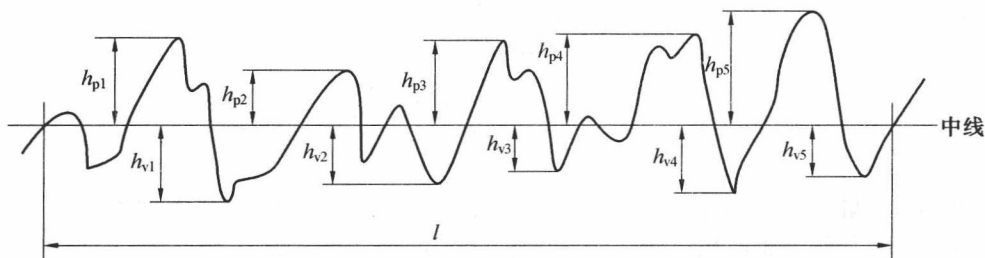


图 1.3 微观不平度十点高度 Rz 的测量

(4) 轮廓最大高度 Ry

Ry 是指表面经常出现的微观不平度的最大高度,如图 1.4 所示,即在标准取样长度内轮廓峰顶线和轮廓谷低线之间的距离,注意图 1.4 中所示的个别偶然出现的特大高度 $R_{偶然}$,是不能代表整个表面微观几何特性。通常取若干段,求 Ry 的平均值。

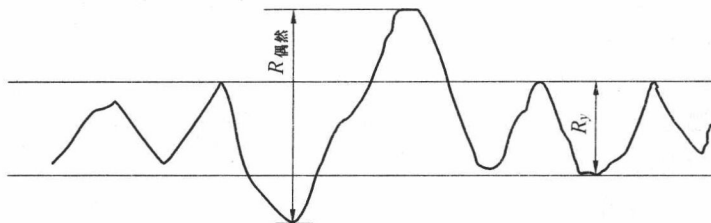


图 1.4 轮廓最大高度 Ry

不同形状和轮廓的表面用上述不同方法测得的粗糙度值也不同,但在一定程度上,

它们之间可以相互换算,见表 1.2。

表 1.2 各种粗糙度间的比值

表 面	$\frac{Rq}{Ra}$	$\frac{Rz}{Ra}$	$\frac{Ry}{Ra}$
车 削	1.1 ~ 1.15	4 ~ 5	4 ~ 5
磨 削	1.18 ~ 1.30	5 ~ 7	7 ~ 14
研 磨	1.3 ~ 1.5		7 ~ 14
随机统计	1.25		8.0

无论是轮廓算数平均偏差 Ra 还是轮廓最大高度 Rz 等,都是用平面垂直于工作表面所得的表面形状特征。所以,这些参数仅能说明表面轮廓在高度方向的偏差,不能说明表面凸峰的斜率、形状、尺寸大小和分布状况等特性。有时可能会碰到峰与谷高度相等,但波长不同的轮廓表面具有相同的 Ra 值,如图 1.5 所示。

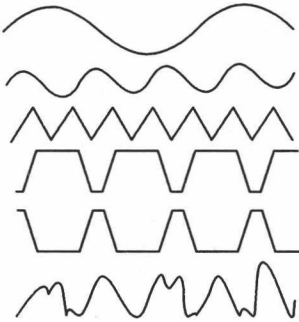


图 1.5 具有相同 Ra 的不同表面

可见,轮廓算数平均偏差 Ra 和 Rz 只能表示同一加工的同类表面的分级,例如对研磨表面来说,尽管加工所用的研磨剂粒度不同,其粗糙度模式还是相同的,从而用一个数值就可以表征这些表面的特性。但是,若要更精确地评定表面轮廓,单靠 Ra 或 Rz 的值是不够的,因此,表面轮廓测量技术的创始人 Abbott - Firestone 创立了描述表面形貌的另一个表面参数:轮廓支承长度率曲线 (Abbott - Firestone 曲线)。

3. 轮廓支承长度率曲线

轮廓支承长度率曲线不仅能表示粗糙表层的微凸体高度的分布,而且也能反映摩擦表面磨损到某一程度时,支承面积的大小。支承长度率曲线是描述轮廓形状的主要指标。为简便起见,一般用二维作图法求支承长度率曲线。

理想的轮廓支承长度率曲线如图 1.6 所示。设一表面受到滑动摩擦,法向载荷作用在摩擦表面微凸体的顶部,使得图中阴影部分面积被磨去,即微凸体顶部变成了平台。若继续进行滑动摩擦,磨损量不断增加,最后所有的微凸体都将被磨去。从理论上讲轮廓支承长度率曲线 ($t_p(l)$) 是表示轮廓支承率 (t_p) 随水平截距 (l) 而变的关系曲线。其作图法是:在标准长度 l 的轮廓曲线上,作与中线平行的一系列直线,如距顶点为 x_1, x_2, x_3 的直线,以通过最高峰顶的线为零位线。

将各条平行线截取的轮廓图形中微凸体的长度相加,画在轮廓图的右边。如距顶

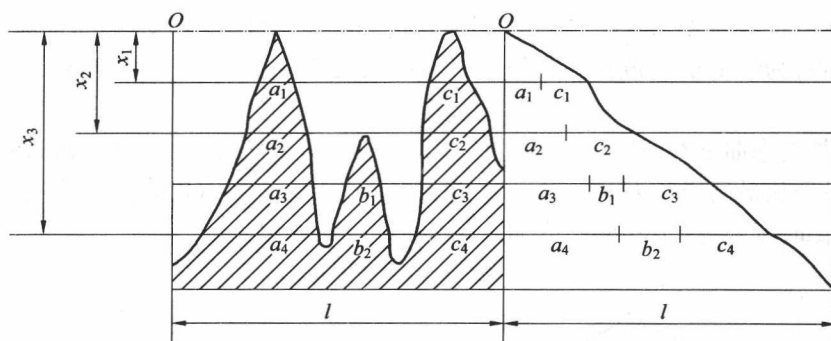


图 1.6 轮廓支承长度率曲线

点为 x_1 、 x_2 和 x_3 的直线截取微凸体的长度分别为 a_1, c_1 ; a_2, c_2 和 a_4, b_2, c_4 , 将它们分别相加, 可得出 3 点, 按此法继续画下去直到轮廓图形的最低点为止。连接图上各点, 就得到支承面积曲线, 即轮廓支承面积曲线是用相对支承长度得到的, 在 GB 3505—1983 中称之为轮廓支承长度率, 表示为

$$t_p = \frac{a + b + c + \dots}{l} \quad (1.4)$$

这样所得的轮廓支承长度率曲线, 根据其陡峭程度及其变化, 就可以大体反映表面粗糙微凸体的斜率、形状、尺寸大小及分布状况等特征。这对提高表面支承能力、延长零件寿命具有重要的意义。

实际上轮廓支承长度率曲线是所有纵坐标分布曲线的累积分布, 如图 1.7(b) 所示, 由于绝大多数工程表面轮廓高度都接近于正态分布, 如图 1.7(a) 所示, 所以支承长度率曲线可表示为

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(z) dz \quad (1.5)$$

式中, z 为从中线开始测量的轮廓高度; $\varphi(z)$ 为轮廓高度分布的概率密度函数。

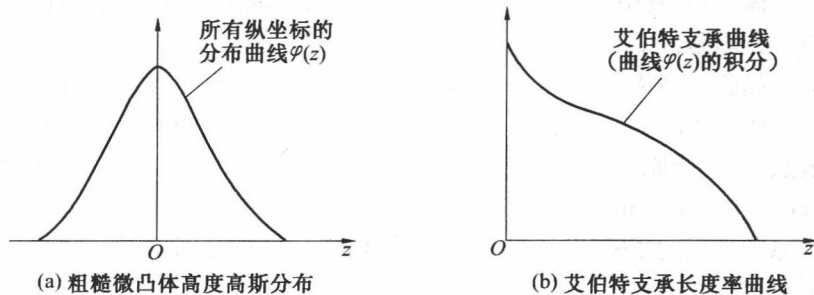


图 1.7 艾伯特支承长度率曲线

不同的加工方法、不同的粗糙度和波纹度会得到不同的轮廓支承长度率曲线。图 1.8 为不同加工方法得到的支承长度率曲线, 图中横坐标为实际接触面积与名义接触面积之比 t_p (即支承长度率), 纵坐标 x 表示线磨损量 L 与轮廓最大高度 R_z 之比。按支承长度的大小将轮廓图形分为三个高度层: 支承长度在 25% 以内的部分称为波峰, 为

最高层;支承长度为 25% ~ 75% 的部分称为波中,为中间层;支承长度大于 75% 的部分称为波谷,为最低层。波峰与摩擦磨损有很大关系,波谷则与润滑情况下储油性有关。

支承长度率曲线在研究摩擦磨损时非常有用,例如,有人对发动机气缸进行金刚石研磨时,发现从最高峰磨去 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 时,支承面积为 50% ~ 60%,容油沟纹的深度为 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$,宽度为 $15 \sim 80 \mu\text{m}$,此时气缸的耐磨性大大提高。

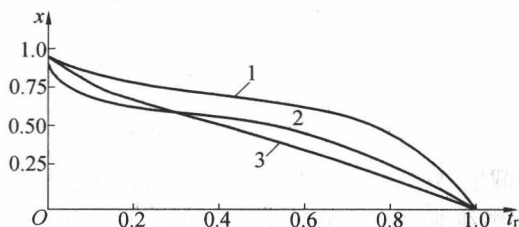


图 1.8 不同加工方法所得典型支承长度率曲线

1—表面抛光;2—表面磨削;3—表面车削

1.1.2 金属的晶体结构

晶体结构即晶体的微观结构。自然界存在的固态物质可分为晶体和非晶体两大类,固态的金属与合金大都是晶体。晶体与非晶体的最本质差别在于组成晶体的原子、离子、分子等质点是规则排列的(长程序),而非晶体中这些质点除与其最近邻外,基本上无规则地堆积在一起(短程序)。金属及合金在大多数情况下都以结晶状态出现。

自然界中的晶体有成千上万种,它们的晶体结构各不相同,但若根据晶胞的三个晶格常数和三个轴间的夹角的相互关系对所有晶体进行分析,发现空间点阵只有 14 种类型,根据晶体的宏观对称性,可将 14 种空间点阵归属 7 个晶系。由于金属原子趋于紧密排列,在工业上使用的金属元素,除了少数具有复杂的晶体结构外,绝大多数都具有比较简单的晶体结构,其中,约有百分之九十以上的金属晶格属于下列 3 种晶体结构。

1. 体心立方晶胞(bcc)

体心立方晶胞模型如图 1.9 所示,晶胞的三个棱边长度相等,三个轴间的夹角均为 90° ,构成立方体。体心立方晶胞在 8 个顶角各有 1 个原子,在其立方体的中心还有一个原子。显然,每一个原子周围有 8 个最近邻原子,因此配位数为 8,属于这种结构的金属有 $\alpha\text{-Fe}$ 、Cr、V、Nb、Mo、W 等。

晶胞中原子排列的紧密程度是反映晶体结构特征的重要因素,通常用配位数和致密度来表征。

所谓配位数是指晶体结构中任一个原子最近邻的等距离的原子数目;致密度是指晶胞中原子所占体积与晶胞体积之比。配位数越高、致密度越大,原子排列越紧密。在体心立方晶格中,以立方体为中心的原子为例,与其最近邻、等距离的原子数有 8 个,所以体心立方晶胞的配位数为 8,其致密度为 0.68。

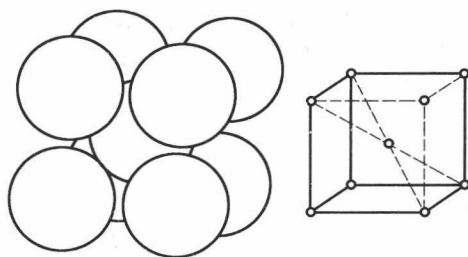


图 1.9 体心立方晶胞

2. 面心立方晶胞 (fcc)

面心立方的晶胞如图 1.10 所示,面心立方的晶胞也是在 8 个顶角各有 1 个原子,构成立方体,在立方体的每一面的中心还各有 1 个原子。面心立方晶胞的配位数是 12,致密度是 0.74。 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag 等金属均为面心立方结构。

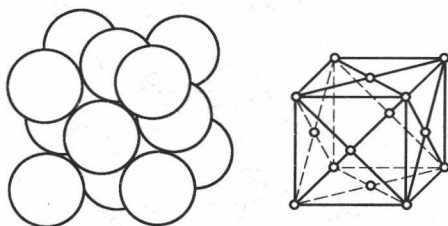


图 1.10 面心立方晶胞

3. 密排六方晶胞 (hcp)

密排六方晶胞如图 1.11 所示,在晶胞的 12 个角上各有 1 个原子,构成立方柱体,上底面和下底面的中心各有 1 个原子,晶胞内还有三个原子。密排六方晶胞的配位数与致密度与面心立方晶胞相同。具有这类结构的金属有 Zn、Mg、Be、 α -Ti、 α -Co、Cd 等。

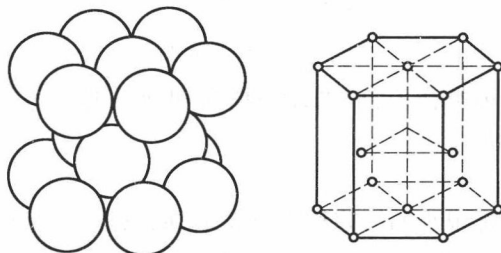


图 1.11 密排六方晶胞

三种典型晶体结构类型的主要特征见表 1.3。

以上所述都是理想晶体的结构,即把金属晶体内的原子排列看做是规则的、完整的,而且每个原子都是在阵点上静止不动的。然而,在实际应用的金属材料中,原子的排列不可能像理想晶体那样规则和完整,总是不可避免地存在一些原子偏离规则排列的不完整区域,这就是晶体缺陷。

表 1.3 典型金属晶体结构特征

结构特征	结构类型		
	体心立方	面心立方	密排六方
晶胞原子数	2	4	6
原子半径	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	$\frac{1}{2}a$
配位数	8	12	12
致密度	0.68	0.74	0.74

1.1.3 金属晶体的缺陷

在实际的晶体中,由于晶体形成条件、原子的热运动及其他条件的影响,原子的排列不可能那样完整和规则,往往存在偏离了理想晶体结构的区域。这些与完整周期性点阵结构的偏离就是晶体中的缺陷,它破坏了晶体的对称性,图 1.12 为晶体表面缺陷。

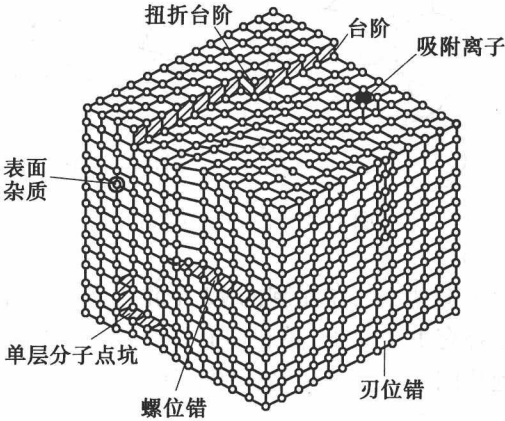


图 1.12 晶体表面缺陷

晶体中存在的缺陷种类很多,根据几何形状和涉及的范围常可分为点缺陷、线缺陷、面缺陷几种主要类型。

1. 点缺陷

在三维方向上尺寸都很小的缺陷称为点缺陷,如空位、间隙原子和置换原子等。

在任何温度下,金属晶体中的原子都是以其平衡位置为中心不间断地进行热振动。晶体中原子在其平衡位置上作高频率的热振动,振动能量经常变化,此起彼伏,称为能量起伏。根据统计规律,在某一温度下的某一瞬间,总有一些原子具有足够高的能量,克服周围原子对它的束缚,脱离原来的平衡位置,于是在原位置上出现了空结点,产生空位。离开平衡位置的原子,如果跑到晶体表面,这样形成的空位称为肖脱基空位,如图 1.13(a);如果跑到点阵间隙位置,则形成的空位称为弗兰克尔空位,如图 1.13(b)。可见每形成一个弗兰克尔空位的同时产生一个间隙原子。由于形成弗兰克尔空位所需的能量比形成肖脱基空位大得多,所以在金属晶体中最常见的是肖脱基空位。空位是